

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Кузбасский научный центр Сибирского отделения
Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова
Кемеровское региональное отделение САН ВШ
АО «Евраз - Объединённый Западно-Сибирский
металлургический комбинат»**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
В ОБРАЗОВАНИИ, НАУКЕ
И ПРОИЗВОДСТВЕ
AS' 2017**

**ТРУДЫ XI ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
*(с международным участием)***

**Новокузнецк
2017**

УДК 658.011.56
С 409

С 409 Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : Труды XI Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под общ. редакцией С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. - Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. - 475 с., ил.

ISBN 978-5-7806-0502-7

Труды конференции посвящены научным и практическим вопросам автоматизации управления технологическими процессами и предприятиями, социально-экономическими системами, образованием и исследованиями. Представлены результаты исследования, разработки и внедрения методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения систем автоматизации и информационно-управляющих систем в различных сферах деятельности.

Сборник трудов ориентирован на широкий круг исследователей, научных работников, инженерно-технический персонал предприятий и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей вузов, аспирантов и студентов.

Организации, поддержавшие конференцию:

*ОК «Сибшахтострой» (г. Новокузнецк),
ЗАО «Стройсервис» (г. Кемерово),
ООО «Центр сварки и контроля» (г. Кемерово),
ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» (г. Новокузнецк),
ООО «Синерго СОФТ СИСТЕМС» (г. Новокузнецк).*

Конференция проведена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-07-20581.

ISBN 978-5-7806-0502-7

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2017

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ МОДЕЛЬ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия*

Машиной двойного питания (МДП) в общем случае называется схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором, в которой на ротор подается напряжение от внешнего источника с возможностью регулирования амплитуды, частоты и фазы этого напряжения [1]. Применение МДП имеет значительные преимущества перед использованием асинхронного двигателя с фазным ротором и роторной станцией, поскольку позволяет управлять потоком энергии скольжения и добиваться высоких показателей энергоэффективности. Для управления МДП в системах управления электропривода необходимо построение ее математической модели. Задачей данной работы является получение простой модели МДП, пригодной для вышеуказанных целей.

Математическое описание машины двойного питания весьма сложно, поскольку момент машины является нелинейной функцией токов обмоток статора и ротора, вследствие чего его идентификация затруднена. Кроме того, из-за наличия в роторе источника добавочного напряжения методы математического моделирования, хорошо подходящие для описания асинхронного двигателя с источником напряжения только в статоре, непригодны для описания МДП.

В работах [1] и [2] предложен способ моделирования МДП с использованием метода ортогональной самоориентирующейся системы координат. Как показано в [2], при использовании данного метода и выборе в качестве опорного изображающего вектора тока статора, модель МДП записывается в виде системы уравнений (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{Sg} = \frac{1/R_S}{T_S p + 1} (u_{Sg} + pL_\mu i_{Rg} + \omega_g L_\mu i_{Ri}) \\ i_{Rg} = \frac{1/R_R}{T_R p + 1} (u_{Rg} - pL_\mu i_{Sg} + \omega_g sL_R i_{Ri}) \\ i_{Ri} = \frac{1/R_R}{T_R p + 1} (u_{Ri} + \omega_g sL_R i_{Rg} - \omega_g sL_\mu i_{Sg}) \\ M = \frac{3}{2} z_{\Pi} L_\mu i_{Sg} i_{Ri} \\ M - M_C = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

где i_{Sg} – проекция изображающего вектора тока статора на ось g вращающейся ортогональной системы координат $g-i$,

i_{Rg}, i_{Ri} – проекции изображающего вектора тока ротора на оси g и i вращающейся ортогональной системы координат $g-i$ соответственно;

u_{Sg}, u_{Si} – проекции изображающего вектора напряжения на статоре на оси g и i вращающейся ортогональной системы координат $g-i$ соответственно;

u_{Rg}, u_{Ri} – проекции изображающего вектора напряжения на статоре на оси g и i вращающейся ортогональной системы координат $g-i$ соответственно;

T_S, T_R – электромагнитные постоянные времени статора и ротора соответственно;

R_S, R_R – активные сопротивления статора и ротора соответственно;

L_μ – индуктивность намагничивания машины;

z_{II} – число пар полюсов машины;

M, M_c – электромагнитный момент машины и момент нагрузки соответственно;

J_Σ – суммарный приведенный к ротору машины момент инерции рабочего механизма;

ω – угловая скорость вращения ротора машины;

ω_g – угловая скорость вращения системы координат, для выбранной системы определяемая по выражению $\omega_g = 2\pi f_c$, где f_c – частота напряжения на статоре;

s – скольжение, определяемое по выражению $s = \frac{\omega_g - \omega}{\omega_g}$;

p – оператор дифференцирования.

Системе уравнений (1) в соответствие может быть поставлена структурная схема МДП, приведенная на рисунке 1.

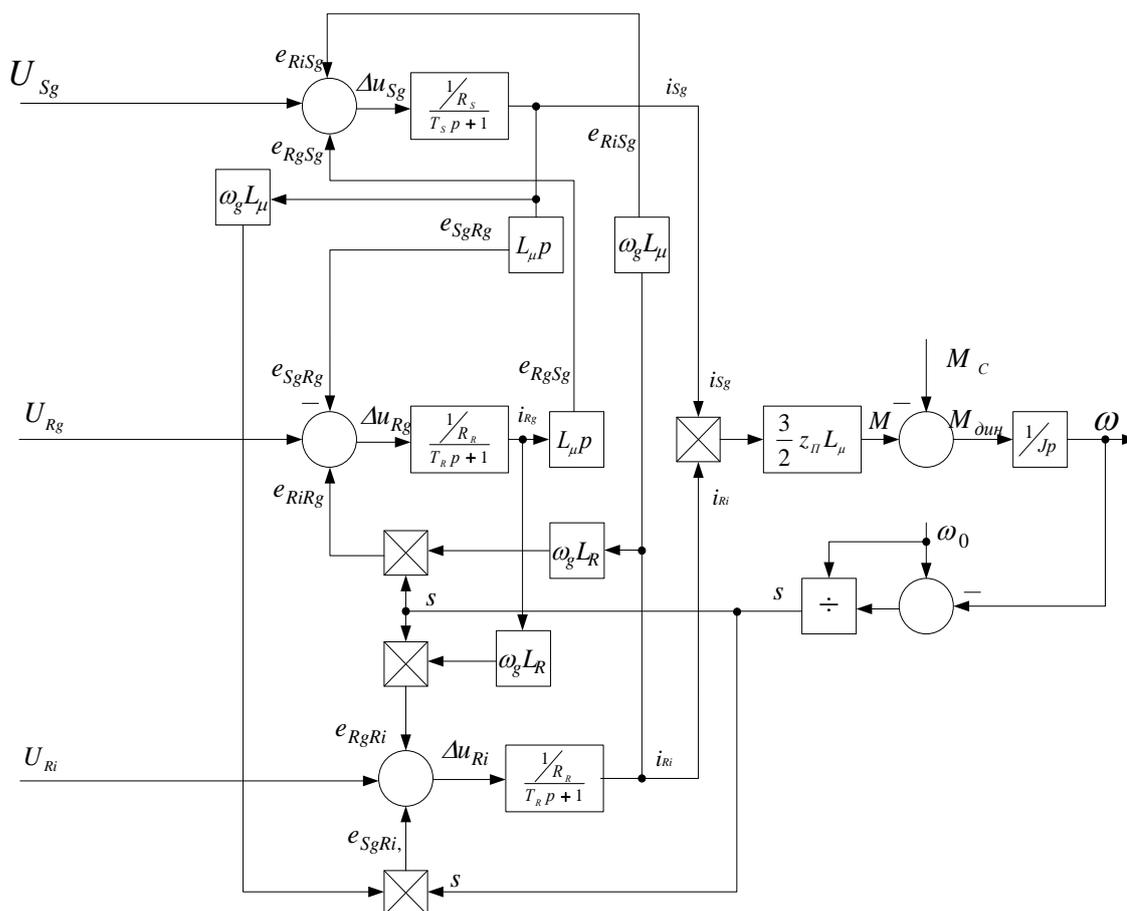


Рисунок 1 – Структурная схема машины двойного питания в системе координат, связанной с током статора

Структурная схема МДП, приведенная на рисунке 1, хотя и имеет простые передаточные функции для обмоток, обладает недостатком – наличием перекрестных обратных связей, соответствующих взаимному влиянию обмоток фаз статора и ротора машины (магнитной связи через сердечники и воздушный зазор и наводимой ЭДС). В [1] доказано, что уравнения электрического равновесия АД по осям системы координат могут быть записаны в операторной форме в следующем виде:

$$u = \frac{1}{k_\Sigma} (T_\Sigma p + 1) \cdot y + f_K(i_S, i_R, \bar{\psi}_S, \bar{\psi}_R, f_R), \quad (2)$$

где u – проекция обобщенного вектора напряжения статора или ротора на соответствующую ось ортогональной системы координат,

T_s – эквивалентная постоянная времени машины;

k_s – эквивалентный коэффициент усиления машины;

i – проекция обобщенного вектора тока статора или ротора на соответствующую ось ортогональной системы координат;

$f_K(\bar{i}_S, \bar{i}_R, \bar{\psi}_S, \bar{\psi}_R, f_R)$ – функция компенсации взаимного влияния фазных обмоток статора и ротора, зависящая от выбранной системы координат.

Таким образом, при условии определения составляющей $f_K(\bar{i}_S, \bar{i}_R, \bar{\psi}_S, \bar{\psi}_R, f_R)$ и уравнивании взаимного влияния фаз с ее помощью, перекрестные обратные связи в структуре, приведенной на рисунке 1, устраняются, а передаточные функции по координатным осям для регулируемых координат просты и эквивалентны апериодическому звену первого порядка.

Взаимное влияние фаз статора и ротора в общем случае обусловлено ЭДС, наводимыми обмотками разноименных фаз статора и ротора между собой. При условии, что фазы статора и ротора машины симметричны и токи и напряжения в обмотках синусоидальны, можно считать, что указанные ЭДС малы по величине по сравнению с ЭДС, наводимыми обмотками фаз статора в обмотках одноименных фаз ротора и наоборот. Таким образом, можно считать, что указанное выше взаимное влияние фаз уравнивается, что позволяет упростить предлагаемую математическую модель МДП и получить более простую эквивалентную модель машины.

Сигналы уравнивания взаимного влияния фаз в выбранной системе координат в соответствии с изложенными выше соображениями, вычисляются по выражениям (3):

$$\begin{aligned} \Sigma e_{RgSg} &= L_\mu \frac{di_{Rg}}{dt}, \Sigma e_{RiSg} = L_\mu \omega_g i_{Ri}, \Sigma e_{SgRg} = L_\mu \frac{di_S}{dt}, \\ \Sigma e_{RiRg} &= \omega_g s L_R i_{Ri}, \Sigma e_{RgRi} = \omega_g s L_R i_{Rg}, \Sigma e_{SgRi} = \omega_g s L_\mu i_{Sg}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Σe – сигнал уравнивания ЭДС;

индекс S – обмотка статора;

индекс R – обмотка ротора;

индекс g – обмотка на оси g двухфазной модели МДП;

индекс i – обмотка на оси i двухфазной модели МДП.

Структурная схема МДП с уравниванием ЭДС составляется на основе схемы, приведенной на рисунке 1. При этом сигналы (3) должны суммироваться с соответствующими сигналами ЭДС и иметь противоположный знак.

Структурная схема МДП с уравниванием ЭДС приведена на рисунке 2.

С учетом выражений (3) и знаков компенсирующих воздействий справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \Sigma e_{RgSg} &= -e_{RgSg}, \Sigma e_{RiSg} = -e_{RiSg}, \Sigma e_{SgRg} = -e_{SgRg}, \\ \Sigma e_{RiRg} &= -e_{RiRg}, \Sigma e_{RgRi} = -e_{RgRi}, \Sigma e_{SgRi} = -e_{SgRi}, \\ k_\partial &= L_\mu \frac{U_{Sg}}{R_S}. \end{aligned} \quad (4)$$

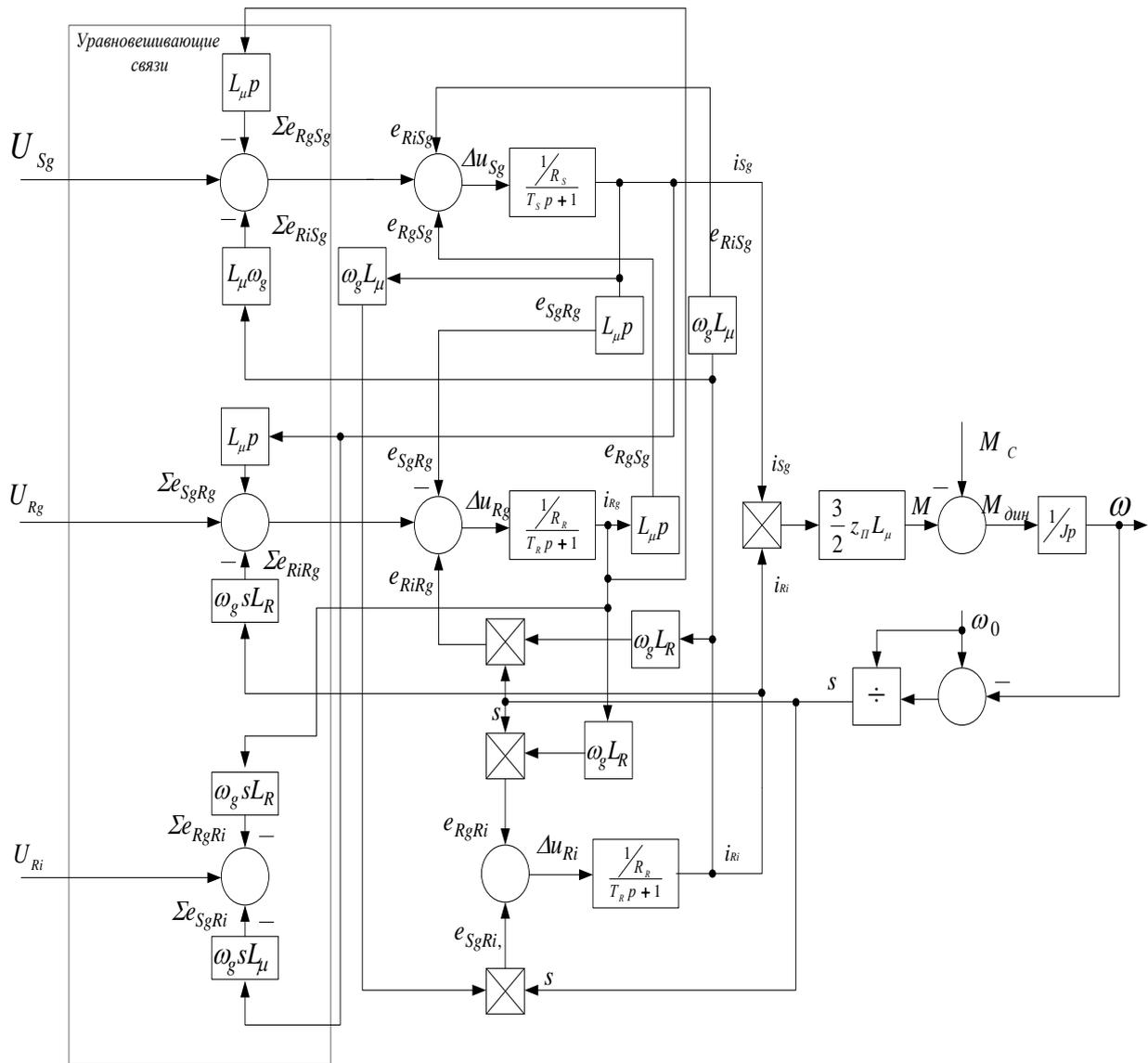


Рисунок 2 – Структурная схема МДП с уравниванием ЭДС

Структурная схема МДП при постоянстве напряжения на статоре и соблюдении условия (4) принимает вид, показанный на рисунке 3.

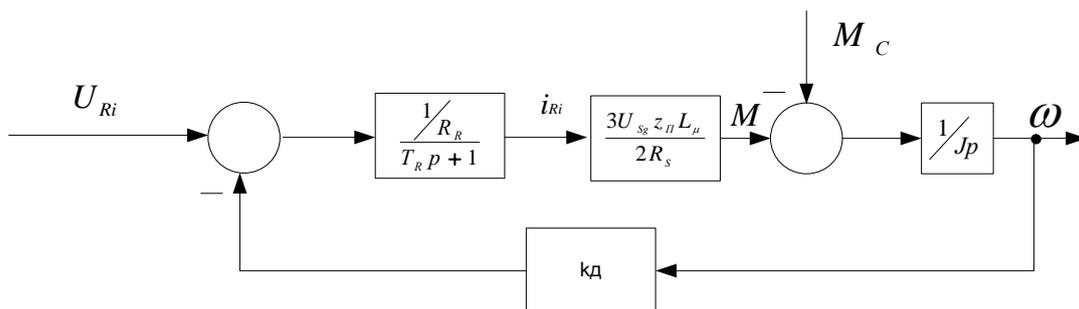


Рисунок 3 – Эквивалентная структурная схема машины двойного питания

Структурная схема, приведенная на рисунке 3, полностью описывает процессы электромеханического преобразования в МДП.

В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 3, передаточная функция для скорости МДП в системе координат, связанной с изображающим вектором статора машины при компенсации взаимного влияния фаз и постоянстве напряжения на статоре имеет вид:

$$\frac{\omega(p)}{u_{Ri}(p)} = \frac{3U_{Sg}z_{\Pi}L_{\mu}}{2J_{R}R_{S}T_{R}p^2 + 2J_{R}R_{S}p + 3\frac{\omega_g}{R_{S}\omega_0}U_{Sg}^2z_{\Pi}L_{\mu}^2} =$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{U_{Sg}L_{\mu}\omega_g}{R_{S}\omega_0}\right)} \cdot \frac{2J_{R}R_{S}T_{R}}{3\frac{\omega_g}{R_{S}\omega_0}U_{Sg}^2z_{\Pi}L_{\mu}^2} p^2 + \frac{2J_{R}R_{S}}{3\frac{\omega_g}{R_{S}\omega_0}U_{Sg}^2z_{\Pi}L_{\mu}^2} p + 1$$

Введя механическую постоянную времени МДП $T_M = \frac{2J_{R}R_{S}}{3\frac{\omega_g}{R_{S}\omega_0}U_{Sg}^2z_{\Pi}L_{\mu}^2}$,

и эквивалентный коэффициент передачи МДП $k_{\mathcal{E}} = \frac{1}{\left(\frac{U_{Sg}L_{\mu}\omega_g}{R_{S}\omega_0}\right)}$, получим:

$$\frac{\omega(p)}{u_{Ri}(p)} = \frac{k_{\mathcal{E}}}{T_M T_R p^2 + T_M p + 1}. \quad (5)$$

Передаточная функция момента с учетом введенных выше обозначений имеет вид:

$$\frac{M(p)}{u_{Ri}(p)} = \frac{T_M / J (T_R p + 1)}{T_M T_R p^2 + T_M p + 1}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) следует, что при принятых допущениях передаточные функции для скорости и электромагнитного момента машины имеют простой вид, удобный для применения в системе управления электроприводом.

Библиографический список

1. Онищенко Г. Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания [Текст] / Г. Б. Онищенко, И. Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
2. Островлянчик В. Ю., Поползин И. Ю. Асинхронный электропривод шахтной подъемной установки, построенный по схеме машины двойного питания с комбинированным управлением [Текст] / В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2016. - №2. – С. 303-309.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

Островлянчик В.Ю., Рыбаков А.И., Поползин И.Ю., Кучик М.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия*

На основании уравнений электрического равновесия обмоток машины двойного питания получены и проанализированы выражения для механической и электромеханической характеристик машины в асинхронном режиме.

СЕКЦИЯ 4. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	341
ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВРЕМЯ-ЧАСТОТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СМЕСЕПРИГОТОВИТЕЛЬНЫМ АГРЕГАТОМ.....	342
Федосенков Д.Б., Симилова А.А. , Федосенков Б.А.	
АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТАТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРЕХОДОМ В ПРОСТРАНСТВО ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ.....	346
Гусев С.С.	
РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	351
Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Ивушкин К.А., Макаров Г.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППАМИ ОБЪЕКТОВ.....	355
Орлова А.С.	
ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ АЙ-ТРЕКЕРА «ФОКУС»	359
Ляховец М.В., Макаров Г.В., Куценко А.И.	
САМООБУЧАЮЩИЕСЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОБОРГ - СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ.....	363
Соловьев В.И.	
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ.....	370
Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Цыганков Ю.А.	
МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ.....	372
Кунинин П.Н., Рыбаков А.И.	
ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ НАГРУЗОК СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.....	378
Новосельцева М.А., Гутова С.Г., Хорошева Т.А., Казакевич И.А.	
ЭКВИВАЛЕНТНАЯ МОДЕЛЬ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	381
Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю.	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ.....	385
Островляничик В.Ю., Рыбаков А.И., Поползин И.Ю., Кучик М.М.	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В СИНХРОННОМ РЕЖИМЕ.....	393
Островляничик В.Ю., Рыбаков А.И., Поползин И.Ю., Кучик М.М.	
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ «ИНЖИНИРИНГ-МЕТАЛУРГИЯ»	401
Рыбенко И.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА УГЛЯ УЧАСТКА БАРЗАСКИЙ 2 ГЛУШИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	405
Шестакова О.Е., Венгер М.К.	